

### Der Simulator "SimCo" als Tool der TA: Experimente zur Verkehrssteuerung

Adelt, Fabian; Hoffmann, Sebastian

Veröffentlichungsversion / Published Version  
Zeitschriftenartikel / journal article

#### Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Adelt, F., & Hoffmann, S. (2017). Der Simulator "SimCo" als Tool der TA: Experimente zur Verkehrssteuerung. *TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis / Journal for Technology Assessment in Theory and Practice*, 26(3), 37-43. <https://doi.org/10.14512/tatup.26.3.37>

#### Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY Lizenz (Namensnennung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>


#### Terms of use:

This document is made available under a CC BY Licence (Attribution). For more Information see:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

# Der Simulator „SimCo“ als Tool der TA

## Experimente zur Verkehrssteuerung

Fabian Adelt, TU Dortmund, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Fachgebiet Techniksoziologie, Otto-Hahn-Str. 4, 44227 Dortmund

(fabian.adelt@tu-dortmund.de),  [orcid.org/0000-0001-9022-5956](https://orcid.org/0000-0001-9022-5956)

Sebastian Hoffmann, TU Dortmund, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Fachgebiet Techniksoziologie

(sebastian3.hoffmann@tu-dortmund.de),  [orcid.org/0000-0001-7865-7772](https://orcid.org/0000-0001-7865-7772)

37

Das Simulationsframework „SimCo“ erlaubt es, die Steuerung komplexer, netzwerkförmiger, soziotechnischer (Infrastruktur-)Systeme zu untersuchen – beispielsweise die des Verkehrs- oder Energiesystems. SimCo basiert auf den Prinzipien der agentenbasierten Modellierung und Simulation. Dynamiken auf der Systemebene werden durch die Interaktion einer Vielzahl strategisch handelnder, heterogener Agenten erzeugt. Mit Hilfe von Simulationsexperimenten lassen sich unterschiedliche Szenarien (mit politisch definierten Zielvorstellungen) hinsichtlich ihrer Wirksamkeit sowie möglicher nicht-intendierter Nebenfolgen testen, denn der Steuerungserfolg hängt letztlich von den Reaktionen der Agenten auf der Mikro-Ebene ab. Ein abstraktes, urbanes Verkehrssystem dient als Anwendungsfall und lässt eine Mischung aus weichen und harten Steuerungsmaßnahmen vielversprechend erscheinen.

### The „SimCo“ Simulator as a TA Tool

Experiments on Traffic Management

*The simulation framework „SimCo“ aims at investigating the governance of complex, network-like, socio-technical (infrastructure) systems like transportation or energy supply. SimCo applies the method of agent-based modeling and simulation, meaning that dynamics at the system level result from the interactions of strategically acting, heterogeneous agents. Since successful governance depends on the agents' reaction at the micro level, simulation experiments with what-if scenarios (with politically defined objectives) can be used to test different governance measures regarding their efficiency and possible unintended side effects. An abstract, urban road transportation system serves as an exemplary case, its results indicate a promising combination of soft and strong control measures.*

**KEYWORDS:** governance, socio-technical systems, ABMS, infrastructure networks, road transportation

This is an article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)  
<https://doi.org/10.14512/tatup.26.3.37>  
Submitted: 05.07.2017. Peer reviewed. Accepted: 30.08.2017

Moderne Gesellschaften sind mit einer Vielzahl von Problemen konfrontiert, z. B. Klimawandel und Umweltverschmutzung, die einen gestalterischen Eingriff erforderlich machen – wie etwa die Entwicklung nachhaltiger soziotechnischer Systeme im Bereich Mobilität. Hierbei werden Instrumente benötigt, welche die Einschätzung derartiger Transformationsprozesse erlauben: Gängige Verfahren sind etwa die Ableitung von Zukunftsszenarien (Foxon 2013; McDowall 2014) sowie die Bewertung von Politikmaßnahmen mit speziellen Analyseinstrumenten (Mazur et al. 2015; Kern 2012). Die Nutzung von Computersimulationen, insbesondere agentenbasierter Modellierung und Simulation (ABMS), stellt hierbei jedoch noch eine relativ junge Methode dar (siehe etwa Köhler et al. 2009; Lopolito et al. 2013). Zu den typischen Zielen einer ABMS zählt beispielsweise, den emergenten Charakter von Wandlungsprozessen besser zu verstehen (Holtz et al. 2015, S. 46 f.), Handlungsempfehlungen für politische Akteure zu generieren sowie die Auswirkungen kombinierter Politikmaßnahmen im Vorfeld experimentell zu überprüfen (van der Vooren und Brouillat 2015). Daher ist auch die Technikfolgenabschätzung ein geeignetes Einsatzfeld für Computersimulationen, denn sie erfüllen letztlich sowohl eine Erkenntnis- als auch eine Kommunikationsfunktion (Scheer 2013, S. 26).

### Vorstellung des Frameworks

SimCo (Simulation of the Governance of Complex Systems) ist ein agentenbasiertes Simulationsframework zur Untersuchung von Governance-Fragestellungen – besonders hinsichtlich der Steuerung komplexer, netzwerkförmiger Infrastruktursysteme wie des Verkehrssystems (Adelt et al. 2014; Weyer 2011). Es basiert auf einem soziologischen Makro-Mikro-Makro-Modell eines soziotechnischen Systems (Coleman 1990; Esser 1993), welches Dynamiken auf Systemebene als Resultat des (Inter-)Agierens heterogener Akteure (Mikro-Ebene) beschreibt. Akteure werden vom aktuellen Zustand des Systems beeinflusst – etwa von infrastrukturellen Rahmenbedingungen, welche zugleich An-

satzpunkte für steuernde Eingriffe liefern. Diese haben keinen direkten Einfluss auf die Strukturen eines soziotechnischen Systems, sondern beeinflussen das Handeln strategischer Akteure auf der Mikro-Ebene (z. B. Nutzer, Konsumenten), was schließlich zu emergenten Effekten auf der Makro-Ebene führen kann (z. B. Stau oder Regimewandel). Die Entscheidungen der Akteure auf der Mikro-Ebene werden von der jeweiligen Wahrnehmung situativer Einschränkungen sowie individuellen, teilweise konfligierenden Präferenzen und Bewertungskriterien bestimmt: Akteure handeln begrenzt rational und maximieren ihren subjektiv wahrgenommenen Nutzen (Esser 1993).

### Ziel und Aufgabe

SimCo zielt primär darauf ab, zwei Kernprobleme von Governance zu untersuchen (Adelt et al. 2014). Dies ist einerseits das Risikomanagement von komplexen soziotechnischen Systemen: Operatives Risikomanagement zielt typischerweise darauf ab, unerwünschte externe Effekte, z. B. Umweltverschmutzung, zu reduzieren und Systemfehler zu verhindern, z. B. Verkehrsstaus oder Blackouts im Stromnetz. Andererseits setzt sich Governance mit Systemtransformation auseinander: So soll mit politischen Maßnahmen oft ein Regimewandel erreicht werden, z. B. nachhaltige Mobilität, was potenziell mit einem fundamentalen Wandel des bestehenden Systems einhergeht (Loorbach et al. 2011). Folglich sind Governance-Maßnahmen mit dualen – teilweise ambivalenten – Anforderungen konfrontiert: Sie lenken den Wandel eines Systems bei gleichzeitiger Beibehaltung seiner Funktionalität.

Deshalb sollen mit SimCo verschiedene What-if-Szenarien mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen durchgespielt werden, um Aussagen darüber zu treffen, inwiefern verschiedene Governance-Modi (Selbstkoordination, weiche, harte oder kombinierte Steuerung) die Performance des Systems beeinflussen und letztlich dabei helfen, die oben definierten Zielvorstellungen zu realisieren (Weyer et al. 2015). Auch wenn in der Regel kein linearer Zusammenhang zwischen Steuerungsmaßnahme und Steuerungsziel existiert, und sich komplexe soziotechnische Systeme nur bedingt kontrollieren lassen (Holtz et al. 2015), sollen die drei Governance-Modi dennoch dazu dienen, emergente Effekte von Eingriffsmaßnahmen einzuschätzen.

### Übersicht der Modellkomponenten

SimCo wurde als universell anwendbares Framework konzipiert. Es besteht aus abstrakten Knoten, Kanten, Agenten und Technologien, die szenariospezifisch ausgestaltet werden können. Hier-

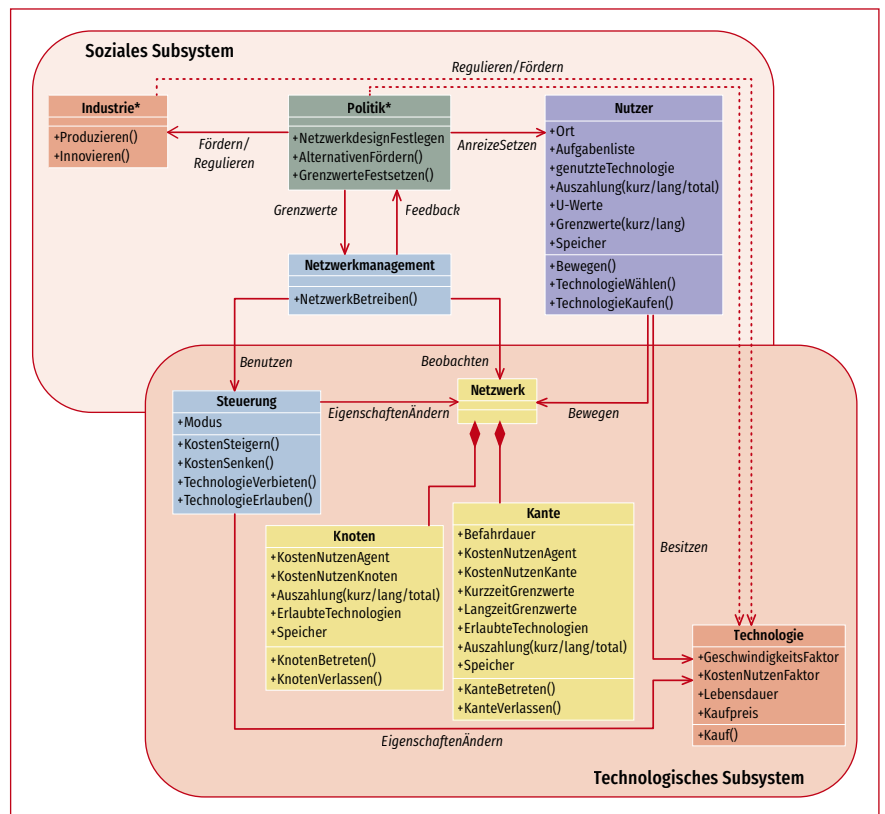


Abb. 1: Subsysteme und ihre Interdependenzen innerhalb des SimCo-Frameworks. Quelle: Eigene Darstellung

für werden frei programmierbare „Dimensionen“ genutzt, die je nach Anwendungsfall hinsichtlich Semantik und Wertebereich zu definieren sind. Für den Fall des urbanen Straßentransports wurden etwa Geld, Komfort, Emissionen und (Verkehrswege-) Kapazität als relevante Dimensionen festgelegt. Ein ähnliches Vorgehen findet sich beim *multi-dimensional practices space* von Köhler et al. (2009, S. 2987), der Wertedimensionen abbildet, anhand derer das Verhalten von Akteuren definiert wird. Sie dienen in SimCo als Bezugspunkt für eine Vielzahl von Modellkomponenten (siehe unten).

Komplexe Systeme wie das des urbanen Verkehrs setzen sich aus einer Vielzahl sozialer, technischer und soziotechnischer Subsysteme zusammen (Geels 2012). Abbildung 1 zeigt die wichtigsten Subsysteme und deren Interdependenzen, die im Folgenden vorgestellt werden.

Zentrale Akteure des sozialen Subsystems sind die Nutzer, die Verkehrsmittel regelmäßig nutzen bzw. periodisch anschaffen. Sie wählen das Verkehrsmittel, das am ehesten ihre individuellen Präferenzen bedient (z. B. Umweltfreundlichkeit oder Komfort) und ihnen bei der Erfüllung bestimmter Aufgaben bzw. täglicher Mobilitätsroutinen hilft (z. B. zur Arbeit fahren oder Einkäufe erledigen). Neben den Nutzern beinhaltet dieses Subsystem: das Netzwerkmanagement bzw. die Verkehrssteuerung, welche einen reibungslosen Betrieb gewährleisten soll und bei Bedarf mit Hilfe eines Repertoires an unterschiedlich starken

Maßnahmen interveniert (Sandrock und Riegelhuth 2014); Politiker, die Grenzwerte und Fördermaßnahmen beschließen; und schließlich Produzenten aus dem Industriesektor, die verschiedene Verkehrsmittel und Transporttechnologien bereitstellen. In der vorliegenden Version von SimCo beschränken wir uns auf Nutzer-Agenten und Verkehrsmanagement-Agenten.

Das technische Subsystem besteht einerseits aus den Technologien, die den Nutzern zur Verfügung stehen: Autos, Fahrräder oder ÖPNV. Jedes Verkehrsmittel verfügt über eigene Charakteristika, die sich auf die o. g. Dimensionen beziehen: Ein Fahrrad produziert beispielsweise keine Emissionen und belegt wenig Platz auf der Straße, mit dem Auto kommt man in der Regel jedoch schneller voran. Die Verkehrsinfrastruktur, welche aus einem Netz von Knoten und Kanten besteht, stellt einen weiteren, wichtigen Teil dieses Subsystems dar (Merriman 2009): Knoten können sowohl *points of interest* für die Nutzer sein – etwa ein Supermarkt, der Arbeitsplatz oder das eigene Zuhause – als auch bloße Verbindungspunkte zwischen Kanten, z. B. Kreuzungen oder Bahnhöfe. Kanten stellen Verkehrsverbindungen zwischen Knoten dar. Sie können sowohl Straßen umfassen, welche von unterschiedlichen Verkehrsmitteln genutzt werden können, aber auch Verkehrswege, die nur für bestimmte Verkehrsmittel zur Verfügung stehen (z. B. reine Radwege oder Straßenbahnlinien).

Dem Netzwerkmanagement stehen verschiedene Steuerungsmaßnahmen zur Verfügung, um Ziele wie Systemerhaltung bzw. -transformation zu verfolgen. Diese Eingriffe beziehen sich auf die zuvor genannten „Dimensionen“, die einerseits als Messwerte zur Überwachung des Systems (z. B. Kapazitätsauslastung von Kanten als Indikator für Staus) und andererseits als Ausgangspunkt für Interventionen dienen: So kann u. a. die Nutzung einer Technologie auf einer Kante verteuert werden (z. B. Pkw-Maut) oder ein Knoten für eine bestimmte Technologie gesperrt werden (z. B. Fußgängerzone). Das System kann in folgenden Governance-Modi betrieben werden (Weyer et al. 2015):

- Selbstkoordination, in der sich die Agenten untereinander koordinieren und das Netzwerkmanagement das Geschehen lediglich beobachtet, aber nicht interveniert;
- weiche Steuerung mittels negativer oder positiver Anreize, um ein bestimmtes Verhalten (un-)attraktiver zu gestalten;
- harte Steuerung mittels Verboten, beispielsweise für die Nutzung bestimmter Technologien auf einzelnen Kanten;
- die Kombination der letzten beiden Maßnahmen.

### Prozessüberblick und Interaktionen

In jedem Simulationsschritt bewegen sich die Nutzer-Agenten durch das Verkehrsnetz. Dabei verfolgen sie eine Aufgabenliste und bewerten jede verfügbare Handlungsalternative auf Basis individueller Präferenzen (Velasquez und Hester 2013) und situativ wahrgenommener Beschränkungen. Bei der Aufgabenliste handelt es sich um eine Liste von Knoten, die der Agent bereisen muss – beispielsweise muss er zur Arbeit, zum Einkaufen und wieder nach Hause. Dabei greifen wir auf Essers Theo-

rie des subjektiv erwarteten Nutzens zurück (*subjective expected utility*, *SEU*, Esser 1993), der mithilfe folgender Formel berechnet wird:

$$SEU(A_i) = \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot U(O_j)$$

Ein Akteur bestimmt den erwarteten Nutzen *SEU* einer Handlungsalternative  $A_i$  auf Basis der wahrgenommenen Wahrscheinlichkeit  $p_{ij}$ , dass die Handlung zu einem Ziel  $O_j$  führt, dessen Erreichung er ferner eine Wichtigkeit  $U$  zuschreibt; er wählt schließlich die Handlungsalternative mit dem höchsten erwarteten Nutzen (Esser 1993, S. 9).

Bezogen auf den Fall der Verkehrsmittelwahl stellen die Kombinationen aus möglichen Routen und darauf nutzbaren Verkehrsmitteln die Menge der Handlungsalternativen  $A$  dar: Ein Akteur kann etwa mit dem Rad oder dem Auto zur Arbeit fahren (ein Technologiewechsel ist dabei nur auf „Home-Knoten“ erlaubt). Individuelle Ziele  $O$  und ihre beigemessene Wichtigkeit  $U$  geben an, *inwiefern* ein Akteur „schnell“, „kostengünstig“, „umweltfreundlich“ und „komfortabel“ reisen möchte (Flade 2013, S. 91 f.). „Geschwindigkeit“ bezieht sich auf keine der zuvor genannten Dimensionen, sondern stellt eine eigene Variable  $u$  a. für die Modellierung der Handlungswahl der Agenten dar. Mit Hilfe unterschiedlicher Präferenzen  $U$  lassen sich heterogene Akteurstypen ableiten, etwa „Umweltorientierte“ oder „Sparfüchse“ (siehe unten). In unserer Adaption des SEU-Modells sind die wahrgenommenen Wahrscheinlichkeiten  $p$  nicht ausschließlich fixe Werte, sondern teilweise situationsabhängig, z. B. beeinflusst von der aktuellen Verkehrslage und den ggf. variablen Eigenschaften eines Verkehrsmittels. Hierbei basie-

*Tägliche Entscheidungen werden  
nicht zwangsläufig rational  
kalkulierend getroffen, sondern  
sind häufig von mental verankerten  
Routinen bestimmt.*

ren die Einschätzungen der Verkehrsmittel auf *subjektiv wahrgenommenen* Kosten und Nutzen, nicht auf objektiven Indikatoren (z. B. €/km oder gCO<sub>2</sub>/km), welche häufig in ABMS eingesetzt werden (Köhler et al. 2009; Lopolito et al. 2013). So wurden U- und p-Werte im Rahmen einer Befragung von 506 Personen (siehe unten) erhoben: In dieser sollten Probanden beispielsweise die Wahrscheinlichkeit einschätzen, mit einem bestimmten Verkehrsmittel ein angestrebtes Ziel zu erreichen (p-Werte) – also etwa mithilfe des Autos schnell, umweltschonend oder günstig zum Ziel zu kommen. Darüber hinaus sollten sie auch ihre individuellen Ziele bewerten (U-Werte).

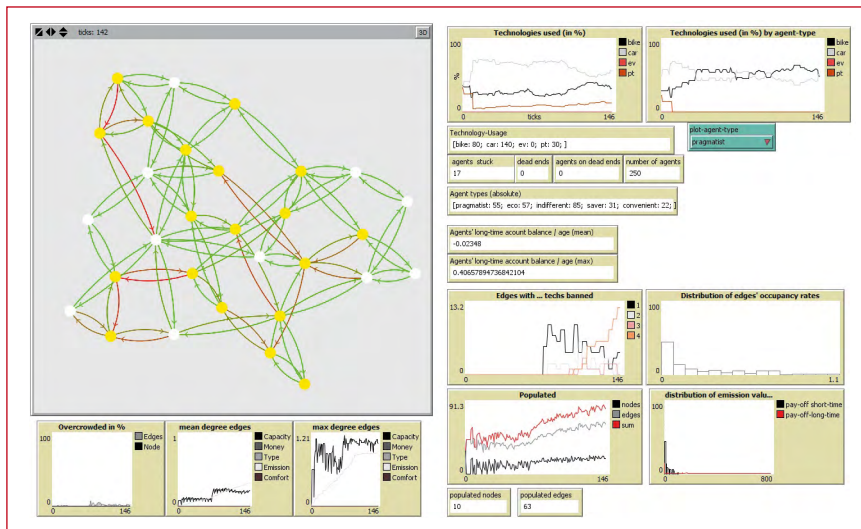


Abb. 2: Screenshot von SimCo (beispielhaftes kleines Netz mit 30 Knoten und 250 Agenten).

Quelle: Eigene Darstellung

	Typ	Beschreibung	Anzahl
<b>Knoten</b>	Home	Start- und Endorte (zu Hause, Technologiewechsel erlaubt)	204
	Task	Knoten zur Aufgabenerfüllung (Einkaufszentren, Arbeitsplatz etc.)	236
	Standard	Verbindungspunkte (Kreuzungen, Bahnhöfe, Auffahrten)	160
<b>Kanten</b>	Shared-small	Gemeindestraßen; alle Verkehrsmittel	984
	Shared-big	Landstraßen; alle Verkehrsmittel	110
	Car-only	Schnellstraßen; nur Autos	104
	Bike-only	Reine Radwege; nur Fahrräder	3
	PT-only	Straßenbahnlinien; nur ÖPNV	110
<b>Agenten</b>	Pragmatiker		1.000
	Umweltbewusste		600
	Indifferente		1.800
	Sparfüchse		600
	Komfortorientierte		2.000

Tab. 1: Konfiguration des Basis-Szenarios.

Quelle: Eigene Darstellung

Tägliche Entscheidungen werden jedoch nicht zwangsläufig bewusst und rational kalkulierend getroffen, sondern sind häufig von mental verankerten Routinen bestimmt (Kroneberg 2014, S. 98; Schwanen et al. 2012). Um dies im SEU-Modell abzubilden, wurden ‚versteckte‘ Präferenzen für die Nutzer-Agenten eingefügt: Neben den oben genannten vier Zielen wollen sich Akteure, sofern jeweils verfügbar, gewohnheitsmäßig ‚mit dem Auto‘, ‚mit dem Fahrrad‘ oder ‚mit den öffentlichen Verkehrsmitteln‘ fortbewegen. Dadurch wird die Wahl eines bestimmten Verkehrsmittels wahrscheinlicher, unabhängig von der derzeitigen Situation eines Akteurs (Kroneberg 2014, S. 100).

In jedem Simulationsschritt verändern die Nutzer-Agenten ihren eigenen Zustand, weil das Bereisen von Knoten und Kanten Kosten verursacht (z. B. Abnutzung, Spritkosten, Parkgebühren, Maut etc.) oder Nutzen generiert (z. B. Einkommen durch Besuch eines Aufgaben-Knotens). Wenn ein Agent seine persönlichen (Langzeit-)Limits überschreitet (z. B. sein Kostenlimit), scheidet er aus der Simulation aus und wird durch einen neuen Agenten eines zufälligen Typs ersetzt. Damit lässt sich ein vereinfachter evolutionärer Lernmechanismus abbilden: Langfristig steigt der Anteil von Agenten jener Typen, die besser mit den jeweiligen Bedingungen, beispielsweise einer erhöhten Maut, zurechtkommen und ihr Verhalten ggf. anpassen. Gleichzeitig ändern Agenten durch ihre Aktionen den Zustand des Netzwerkes: Die freie Kapazität einer Straße verringert sich, wenn sie stark befahren wird, Emissionen werden ausgestoßen und so weiter. Somit ändert sich der Zustand des Gesamtsystems durch die Aktionen und Interaktionen der heterogenen Agenten permanent (Gilbert 2008, S. 15, 33).

Werden schließlich (politisch festgelegte) Grenzwerte erreicht, kann das Netzwerkmanagement mit Hilfe der zuvor beschriebenen Governance-Modi eingreifen, beispielsweise im Fall von hohen Emissionswerten oder Stau.

## Implementation

SimCo wurde in NetLogo (Wilensky 1999) implementiert, einer Programmiersprache, die häufig für sozialwissenschaftliche ABMS genutzt wird (Epstein 2007). Es hat ein grafisches Nutzer-Interface, in dem die Struktur des Netzwerkes angezeigt und verschiedene Messwerte

ausgegeben werden können, z. B. die Verteilung des Transportaufkommens auf verschiedene Verkehrsmittel, Kapazitätsauslastungen auf Straßen oder aktuelle Emissionswerte (Abb. 2).

## Experimente

### Setup und Basis-Szenario

Als Ausgangspunkt für unsere Szenarien wurde das abstrahierte Verkehrsnetz einer mittleren deutschen Großstadt gewählt, das wir mit (Infrastruktur-)Daten der Stadt Dortmund kalibriert ha-



ben (IT.NRW 2015; Stadt Dortmund 2011, 2004; Lämmer et al. 2006). Die Kalibrierung bezieht sich vorrangig auf die Charakteristika und prozentualen Anteile der verschiedenen Verkehrswege. Da ein abstrahiertes Verkehrsnetz modelliert wird, basiert die Beziehung der Knoten und Kanten nicht auf geographischen Daten, sondern stellt eine zufällige Anordnung dar. Diese wird für die verschiedenen Experimente mit identischen Saatwerten vergleichbar erzeugt. Zudem wurde eine Befragung von 506 Personen durchgeführt, in der die Präferenzen von Verkehrsteilnehmern sowie unterschiedliche Akteurstypen identifiziert wurden. Die Heterogenität der Agentenpopulation (Gilbert 2008, S. 14 ff.) spiegelt sich in den folgenden fünf Nutzertypen wider:

- Pragmatiker, die im Wesentlichen schnell ans Ziel kommen wollen;
- Umweltbewusste, die besonders auf Umweltauswirkungen eines Transportmittels achten;
- Indifferente, die keine klaren Präferenzen aufweisen;
- Sparfüchse, die primär die Kosten eines Verkehrsmittels als Bewertungskriterium heranziehen;
- Komfortorientierte, denen neben der Geschwindigkeit vor allem der Komfort wichtig ist.

Das Basis-Szenario, in dem die Nutzer-Agenten sich selbst koordinieren – also keine Intervention durch die Verkehrssteuerung stattfindet – bietet den Referenzpunkt für Vergleiche mit verschiedenen Steuerungsszenarien (siehe unten). Die genaue Basisconfiguration kann Tabelle 1 entnommen werden.

### Maßzahlen

Zur Beurteilung des Erfolges der Steuerungsmaßnahmen betrachten wir die Änderungen im Technologiewahlverhalten der Population. Da die Technologienutzung direkt die im Netz ausgestoßenen Emissionswerte bedingt, verzichten wir hier auf eine gesonderte Darstellung. Als zweiten Messwert ziehen wir die Anteile der fünf Agententypen an der Gesamtpopulation heran und können so darstellen, inwiefern sich die Population verändert und ob einzelne Agententypen positiv oder negativ beeinflusst werden.

Neben der Art des Eingriffs (weich, hart, kombiniert) unterscheiden sich die Experimente hinsichtlich der Höhe des Anreizfaktors, seien es z. B. Komfort- oder Kostensteigerungen. Die Anreizhöhe „1“ stellt dabei den Normalzustand ohne steuernden Eingriff dar.

### Szenario 1: Statische Eingriffe

Statische Maßnahmen basieren auf einer Veränderung der Rahmenbedingungen für einen längerfristigen Zeitraum. Im Falle weicher Steuerung umfasst dies beispielsweise eine grundsätzliche Änderung von Technologieeigenschaften, etwa eine Verteuerung des Autos (negativer Anreiz) oder eine (wie auch immer geartete) Komfortsteigerung des ÖPNV (positiver Anreiz).

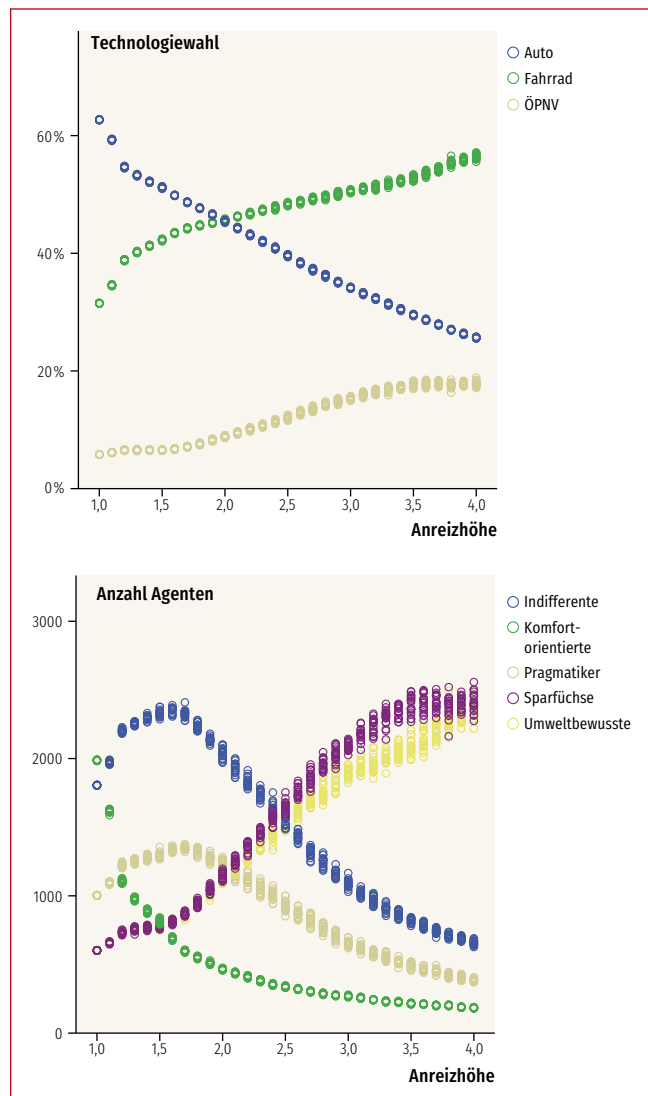


Abb. 3: Ergebnisse: Statische Kostensteigerung Auto. Quelle: Eigene Darstellung

Negative Anreize (Kostensteigerung der Autonutzung, Abb. 3) führen zu direkten Änderungen bei der Verkehrsmittelwahl. Auf Populationsebene zeigt sich ein direkter Rückgang der Autonutzung. Es wird bei moderaten Preiserhöhungen zuerst durch das Fahrrad ersetzt, das die Bedürfnisse der Agenten offensichtlich besser erfüllt. Erst mit hohen Steigerungsraten steigt auch die Nutzung des ÖPNV an, auch bedingt durch die Änderungen der Agentenzahlen und den damit verbundenen Lerneffekt auf Populationsebene. Dann allerdings schaffen es nur noch „Ökologiebewusste“ und „Sparfüchse“, ihre Aufgaben (beispielsweise innerhalb der gegebenen Kostenlimits) zu erfüllen, die anderen Agententypen sind zumindest stark dezimiert.

### Szenario 2: Situative Eingriffe

Situative Maßnahmen basieren auf einem dynamischen Steuerungsalgorithmus, der zwischen Selbstkoordination (keine Inter-

Eingriff	Stärke	Fahrrad	Auto	ÖPNV	Pragmatiker	Umweltbewusste	Indifferente	Sparfüchse	Komfortorientierte
–	–	0,31	0,62	0,05	1.003	601	1.805	602	1.987
weich	gering	0,41	0,52	0,06	1.282	770	2.306	773	866
	mittel	0,45	0,46	0,08	1.263	1.053	2.163	1.070	448
	hoch	0,47	0,40	0,11	929	1.527	1.593	1.653	296
hart	–	0,41	0,52	0,06	1.025	614	1.843	614	1.902
kombiniert	gering	0,45	0,47	0,06	1.195	716	2.150	716	1.220
	mittel	0,48	0,44	0,06	1.306	786	2.355	787	763
	hoch	0,51	0,40	0,08	1.274	1.059	2.190	1.057	417

Tab.2: Ergebnisse: Situative Eingriffe.

Quelle: Eigene Darstellung

vention) und (weicher bzw. harter) Steuerung wechselt, sobald festgelegte Grenzwerte überschritten werden: Wenn 60 % eines Grenzwertes erreicht sind, wird die weiche Steuerung aktiviert; bei über 80 % wirkt die harte Steuerung. Im Falle weicher Steuerung werden betroffene Knoten und Kanten schrittweise unattraktiv gemacht (hier durch die Erhöhung von Nutzungsgebühren für das Auto) – in der Hoffnung, dass Nutzer-Agenten ihr Verhalten ändern und so das vorliegende Problem gelöst wird. Bei harter Steuerung wird die Nutzung des Autos auf belasteten Kanten verboten. Sobald die Messwerte gesunken sind, werden die Maßnahmen (schrittweise) aufgehoben. Situative Eingriffe setzen also prinzipiell voraus, dass ein „smartes“ Echtzeit-Verkehrsmanagementsystem existiert (Baumann und Püschner 2016; Flügge 2016, S. 150; Weyer 2011, S. 17), das Zugriff auf alle relevanten Daten hat.

Die Stärke der weichen Steuerungseingriffe (hier die durchschnittliche Kostenerhöhung) variiert zwischen den Experimenten, da der Steuerungsalgorithmus mit unterschiedlichen Parametern (z. B.: „Wie schnell soll die Maut steigen?“) justiert werden kann. Deshalb unterteilen wir die Ergebnisse (Tab. 2) in drei Gruppen (geringe, mittlere und hohe Eingriffsstärke). Weiche Steuerung provoziert bereits bei geringer Eingriffsstärke deutliche Wechsel im Technologiewahlverhalten, die nur leichte Änderungen auf der Populationsebene nach sich ziehen. Lediglich „Komfortorientierte“, die auf der Nutzung des Autos beharren, sowie einige „Indifferente“ werden negativ beeinflusst. Harte Steuerung zeigt keine negativen Auswirkungen auf die Population, aber ähnliche Resultate wie die weiche Steuerung im Hinblick auf die Technologiewahl. Agenten werden also durch lokale Verbote nicht nur zu Routenänderungen, sondern in gewissem Maße auch zum Wechsel der genutzten Technologie veranlasst. Im Hinblick auf hohe Änderungsraten bei der Technologiewahl und möglichst geringe Änderungsquoten bei der Population erweist sich schließlich der kombinierte Steuerungsmodus als ideal. Ferner zeigt sich (nicht in der Tabelle dargestellt), dass nur durch Hinzunahme der harten Steuerung ein positiver Effekt hinsichtlich des Emissionsausstoßes auf den am stärksten genutzten Kanten zu erzielen ist.

## Diskussion und Fazit

Der Beitrag hat das abstrakte Simulationsframework SimCo anhand von Governance-Experimenten mit einem urbanen Transport-Szenario vorgestellt. Sowohl statische als auch situativ bedingte weiche Steuerungsimpulse führten zu einer Änderung im Technologiewahlverhalten der Agenten, also zur Reduktion des Autoverkehrs und der dadurch bedingten Emissionen. Insbesondere die situative Kombination von weicher und harter Steuerung zeigte insofern interessante Ergebnisse, als ein starker Wandel hinsichtlich der Technologienutzung bei geringer Änderung der Population möglich war. Denn es ist zu vermuten, dass leichte Änderungen der Population als Lernprozess, zu starke Schwankungen dagegen als soziale Unzufriedenheit zu interpretieren sind.

Unter Bezug auf die Experimente mit situativen Steuerungseingriffen wäre es interessant zu überprüfen, inwiefern sich die Effizienz von Interventionsmaßnahmen ändert, wenn die Verkehrssteuerung mit unvollständigen oder zeitverzögerten Informationen arbeiten muss – etwa, wenn Daten nicht in Echtzeit gesammelt werden oder Nutzer nicht bereit sind, Daten preiszugeben. Zukünftige Weiterentwicklungen des SimCo-Frameworks sollten sich u. a. mit dieser Fragestellung auseinandersetzen – vor allem vor dem Hintergrund aktueller Debatten zu „Big Data“ (Flügge 2016).

## Literatur

- Adelt, Fabian; Weyer, Johannes; Fink, Robin D. (2014): Governance of Complex Systems: Results of a Sociological Simulation Experiment. In: *Ergonomics* 57 (3), S. 434–448.
- Baumann, Stefanie; Püschner, Michael (2016): Nutzungsszenarien I. In: Barbara Flügge (Hg.): *Smart Mobility. Trends, Konzepte, Best Practices für die intelligente Mobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 91–98.
- Coleman, James S. (1990): *Foundations of Social Theory*. Cambridge: Harvard University Press.
- Epstein, Joshua M. (2007): *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton: Princeton University Press.
- Esser, Hartmut (1993): *The Rationality of Everyday Behavior: A Rational Choice*

- Reconstruction of the Theory of Action by Alfred Schütz. In: *Rationality and Society* 5 (1), S. 7–31.
- Flade, Antje (2013): Mobilitätsmotive. In: Antje Flade (Hg.): *Der rastlose Mensch. Konzepte und Erkenntnisse der Mobilitätspsychologie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 69–95.
- Flügge, Barbara (2016): Mobilitätsrelevante Diagnostik. In: Barbara Flügge (Hg.): *Smart Mobility. Trends, Konzepte, Best Practices für die intelligente Mobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 147–152.
- Foxon, Timothy J. (2013): Transition Pathways for a UK Low Carbon Electricity Future. In: *Energy Policy* 52, S. 10–24.
- Geels, Frank (2012): A Socio-Technical Analysis of Low-Carbon Transitions: Introducing the Multi-Level Perspective into Transport Studies. In: *Journal of Transport Geography* 24, S. 471–482.
- Gilbert, Nigel (2008): The Idea of Agent-Based Modeling. In: Nigel Gilbert (Hg.): *Agent-Based Models*. London: Sage, S. 1–20.
- Holtz, Georg; Alkemade, Floortje; de Haan, Fjalard et al. (2015): Prospects of Modelling Societal Transitions: Position Paper of an Emerging Community. In: *Environmental Innovation and Societal Transitions* 17, S. 41–58. DOI: 10.1016/j.eist.2015.05.006.
- IT.NRW – Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2015): Kommunalprofil Dortmund. Düsseldorf: Information und Technik Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter <http://www.it.nrw.de/kommunalprofil/I05913.pdf>, zuletzt geprüft am 10. 10. 2017.
- Kern, Florian (2012): Using the Multi-Level Perspective on Socio-Technical Transitions to Assess Innovation Policy. In: *Technological Forecasting and Social Change* 79 (2), S. 298–310.
- Köhler, Jonathan; Whitmarsh, Lorraine; Nykvist, Björn; Schilperoord, Michel; Bergman, Noam; Haxeltine, Alex (2009): A Transitions Model for Sustainable Mobility. In: *Ecological economics* 68 (12), S. 2985–2995.
- Kroneberg, Clemens (2014): Frames, Scripts, and Variable Rationality: An Integrative Theory of Action. In: Gianluca Manzo (Hg.): *Analytical Sociology: Norms, Actions, and Networks*. Hoboken: Wiley, S. 97–123.
- Lämmer, Stefan; Gehlsen, Björn; Helbing, Dirk (2006): Scaling Laws in the Spatial Structure of Urban Road Networks. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 363 (1), S. 89–95.
- Loorbach, Derk; Frantzeskaki, Niki; Thissen, Wil (2011): A Transition Research Perspective on Governance for Sustainability. In: Carlo C. Jaeger, J. David Tabara und Julia Jaeger (Hg.): *European Research on Sustainable Development. Volume 1. Transformative Science Approaches for Sustainability*. Berlin: Springer, S. 73–89.
- Lopolito, Antonio; Morone, Piergiuseppe; Taylor, Richard (2013): Emerging Innovation Niches: An Agent Based Model. In: *Research Policy* 42 (6), S. 1225–1238.
- Mazur, Christoph; Contestabile, Marcello; Offer, Gregory J.; Brandon, N. P. (2015): Assessing and Comparing German and UK Transition Policies for Electric Mobility. In: *Environmental Innovation and Societal Transitions* 14, S. 84–100. DOI: 10.1016/j.eist.2014.04.005.
- McDowall, Will (2014): Exploring Possible Transition Pathways for Hydrogen Energy: a Hybrid Approach Using Socio-Technical Scenarios and Energy System Modelling. In: *Futures* 63, S. 1–14. DOI: 10.1016/j.futures.2014.07.004.
- Merriman, Peter (2009): Automobility and the Geographies of the Car. In: *Geography Compass* 3 (2), S. 586–599.
- Sandrock, Michael; Riegelhuth, Gerd (2014): *Verkehrsmanagementzentralen in Kommunen. Eine vergleichende Darstellung*. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Scheer, Dirk (2013): *Computersimulationen in politischen Entscheidungsprozessen. Zur Politikrelevanz von Simulationswissen am Beispiel der CO<sub>2</sub>-Speicherung*. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Schwanen, Tim; Banister, David; Anable, Jillian (2012): Rethinking Habits and Their Role in Behaviour Change: the Case of Low-Carbon Mobility. In: *Journal of Transport Geography* 24, S. 522–532.
- Stadt Dortmund (2004): *Flächennutzungsplan der Stadt Dortmund. Erläuterungsbericht*. Dortmund: Stadt Dortmund Stadtplanungsamt. Online verfügbar unter [http://www.dortmund.de/media/p/stadtplanungs\\_und\\_bauordnungsamt/stadtplanung\\_bauordnung\\_downloads/stadtplanung\\_1/Erlbericht\\_DO\\_04\\_FNP.pdf](http://www.dortmund.de/media/p/stadtplanungs_und_bauordnungsamt/stadtplanung_bauordnung_downloads/stadtplanung_1/Erlbericht_DO_04_FNP.pdf), zuletzt geprüft am 10. 10. 2017.
- Stadt Dortmund (2011): *Lebensraum Dortmund. Jahresbericht*. Dortmund: Stadt Dortmund Fachbereich Statistik. Online verfügbar unter [http://www.dortmund.de/media/p/statistik\\_3/statistik/veroeffentlichungen/jahresberichte/lebensraum/195\\_2011\\_lebensraum.pdf](http://www.dortmund.de/media/p/statistik_3/statistik/veroeffentlichungen/jahresberichte/lebensraum/195_2011_lebensraum.pdf), zuletzt geprüft am 10. 10. 2017.
- van der Vooren, Alexander; Brouillat, Eric (2015): Evaluating co2 Reduction Policy Mixes in the Automotive Sector. In: *Environmental Innovation and Societal Transitions* 14, S. 60–83.
- Velasquez, Mark; Hester, Patrick T. (2013): An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. In: *International Journal of Operations Research* 10 (2), S. 56–66. Online verfügbar unter [http://www.orstw.org.tw/ijor/vol10no2/ijor\\_vol10\\_no2\\_p56\\_p66.pdf](http://www.orstw.org.tw/ijor/vol10no2/ijor_vol10_no2_p56_p66.pdf), zuletzt geprüft am 20. 10. 2017.
- Weyer, Johannes (2011): *Netzwerke in der mobilen Echtzeit-Gesellschaft*. In: Johannes Weyer (Hg.): *Soziale Netzwerke. Konzepte und Methoden der sozialwissenschaftlichen Netzwerkforschung*. München: Oldenbourg Verlag, S. 3–38.
- Weyer, Johannes; Adelt, Fabian; Hoffmann, Sebastian (2015): *Governance of Complex Systems: a Multi-Level Model*. Dortmund: TU Dortmund (Soziologische Arbeitspapiere, 42). DOI: 10.17877/DE290R-401.
- Wilensky, Uri (1999): *NetLogo*. Evanston: Northwestern University. Online verfügbar unter <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>, zuletzt geprüft am 10. 10. 2017.



#### FABIAN ADELT

beschäftigt sich seit 2011 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Techniksoziologie an der TU Dortmund mit ABMS und Governance-Fragestellungen. Anwendungsfelder sind u. a. Verkehrs- und Elektrizitätsnetzwerke.



#### SEBASTIAN HOFFMANN

ist seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Techniksoziologie an der TU Dortmund. Aktuelle Forschungsprojekte behandeln den Wandel von (Auto-)Mobilität sowie die Modellierung des Energiekonsumverhaltens von Haushalten.